



УДК 62-573

3.7. ПРИМЕНЕНИЕ ФКУ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ С СЕТЬЮ УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

APPLICATION OF PASSIVE FILTERS FOR IMPROVEMENT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF NETWORK AND INDUCTION MOTOR SOFT STARTERS

Зюзов Анатолий Михайлович, д.т.н., доцент, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Степанюк Дмитрий Павлович, старший преподаватель каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: d.p.stepanyuk@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Бубнов Матвей Владимирович, студент каф. «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: 11r@gmx.us

Anatoliy M. Zyuzev, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Dmitriy .P. Stepanyuk, Senior lecturer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: d.p.stepanyuk@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Matvei V. Bubnov, Student of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 11r@gmx.us

Аннотация: В статье рассмотрена эффективность применения фильтрокомпенсирующего устройства с тиристорным преобразователем напряжения, используемым для организации плавного пуска асинхронного двигателя. Изложена методика расчета параметров фильтров, приводятся результаты моделирования, показывающие значительное снижение уровня высших гармоник при использовании фильтрокомпенсирующего устройства, сделан вывод о целесообразности установки ФКУ в тиристорных системах плавного пуска АД.

Abstract: The paper discusses using of passive filters with thyristor soft starter. Filter parameters calculation procedure is described. Simulation results show that using of passive filters greatly reduce higher harmonics levels.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; тиристорный преобразователь напряжения; плавный пуск; высшие гармоники; фильтрокомпенсирующее устройство.

Key words: induction motor, thyristor voltage converter, soft start, harmonics, passive filter

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день для пуска асинхронных двигателей (АД) достаточно широко применяют устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорного преобразователя напряжения (ТПН).

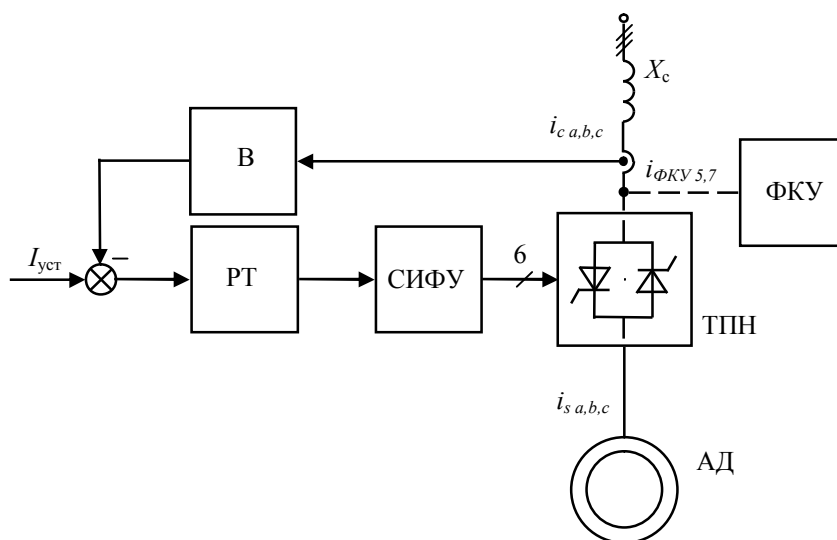
Часто причиной использования УПП является необходимость снижения пусковых токов двигателя и ограничение тем самым провалов напряжения сети на допустимом для нормальной работы других потребителей уровне. Сложившееся в практике электропривода типовое

решение указанной задачи – пуск с отсечкой по току [1]. Реализация данного решения показана на рис. 1. Ограничивая ток при пуске АД на некотором заранее рассчитанном уровне задания (уставки) $I_{уст}$, можно контролировать падение напряжение δU на сопротивлении сети Z_c от этого тока и обеспечить необходимое значение остаточного напряжения в точке подключения преобразователя.

При этом, как известно, при подключении к сети нелинейной нагрузки, такой как ТПН, из сети будет потребляться несинусоидальный ток даже при изначально синусоидальном напряжении питания. В соответствии со спектральным подходом этот ток можно разложить на гармонические составляющие (гармоники). Наличие высших гармоник в потребляемом токе приводит к искажению напряжения сети. Таким образом, с точки зрения электромагнитной

совместимости (ЭМС) ТПН позволяет решить проблему ограничения провалов напряжения сети, но ухудшает ситуацию с его формой.

Несинусоидальность токов и напряжения приводит к следующим отрицательным последствиям: увеличиваются потери мощности, снижается срок службы изоляции оборудования и диэлектриков конденсаторов, нарушается нормальная работа чувствительных электроприемников, защиты, автоматики и связи, а также в цепях возможно появление резонансных эффектов. Экономически это выражается в увеличении капитальных затрат и технологических потерях от остановки оборудования. В связи с все большим распространением регулируемых приводов и других нелинейных нагрузок проблема гармоник в распределительных сетях стоит достаточно остро.



РТ - регулятор тока, СИФУ - система импульсно-фазового управления, В - функциональный преобразователь, ТПН - тиристорный преобразователь напряжения, ФКУ - фильтрокомпенсирующее устройство

Рис. 1. Структурная схема асинхронного электропривода с устройством плавного пуска

Как показывает обзор источников, для УПП на основе ТПН вопрос снижения гармонических искажений питающего напряжения глубоко не рассматривался ни на научном, ни на инженерном уровне.

Целью данной работы является анализ эффективности использования фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) с тиристорными преобразователями напряжения, применяемыми для организации плавного пуска, а так же обоснование и адаптация методики выбора и расчета ФКУ для указанных устройств.

ПУСК В СИСТЕМЕ ТПН-АД БЕЗ ФКУ

Для оценки гармонических искажений, вносимых работой УПП, рассмотрим пуск под отсечку приводного высоковольтного АД ($U_N=10$ кВ, $P_N=550$ кВт) центробежного насоса. Питающая сеть моделировалась индуктивным сопротивлением, такое представление справедливо для высоковольтных сетей. Индуктивность сети принималась $L_c=15,6$ мГн, при этих параметрах просадка напряжения при прямом пуске составит 17%, что не допустимо. Для обеспечения остаточного напряжения в точке подключения УПП на уровне 90% требуется

ограничение пускового тока на уровне $I_{уст}=3,2I_N$, которого достаточно для уверенного запуска двигателя при вентиляторном моменте нагрузки.

Аналитически получить выражения для амплитуд гармоник тока, зависящих от угла управления и параметров цепи, ЭДС двигателя, достаточно сложно, поэтому для этой цели использован метод разложения в ряд Фурье кривой тока преобразователя, полученной в результате моделирования системы ТПН-АД в среде Matlab и ANSYS. Гармонические составляющие тока при пуске с УПП показаны на рис. 2.

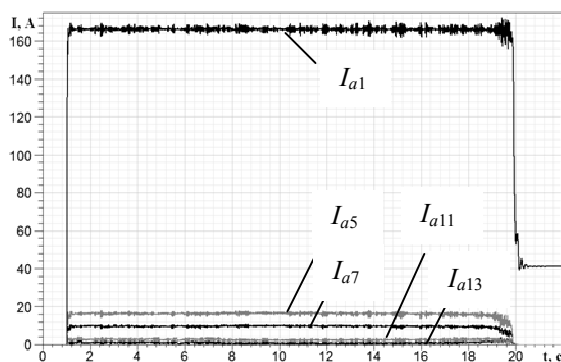


Рис.2. Амплитуды гармонических составляющих тока в системе ТПН-АД при пуске «под отсечку»

С точки зрения гармонического анализа диаграмму пускового тока можно разделить на три этапа.

Первый – начало переходного процесса или выход тока на значение «уставки». Длительность этого участка определяется быстродействием системы, кривая $i(t)$ в этом случае оказывается непериодической и в сети наблюдается «всплеск» высших гармоник.

Второй участок наступает при достижении током значения «уставки». Этот отрезок, как правило, имеет наибольшую продолжительность по времени, на нем при относительно медленном изменении скорости двигателя режим работы ТПН можно считать квазиустановившимся, и ток достаточно точно описывается рядом.

$$i(t) = I_0 + \sum_{v=1}^n I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v),$$

где I_0 – постоянная составляющая, равная нулю;

$I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v)$ – гармоники или гармонические составляющие v -го порядка с амплитудой I_{vm} и начальной фазой ψ_v ;

ω – круговая частота первой гармоники;

n – порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник. [2]

Эти гармоники условно разделяют на канонические и не канонические. Каноническими называют гармоники, которые генерирует идеальный преобразователь без учета реально существующей асимметрии параметров цепи между фазами. ТПН является источником канонических гармоник тока следующих порядков:

$$v = pk \pm 1,$$

где $k=0,1,2,3...n$, p – число коммутаций в преобразователе за период сети, для рассматриваемой схемы ТПН с двумя встречно-параллельными тиристорами в каждой фазе $p=6$, т.е. номера гармоник в данном случае – нечетные и некратные трем.

В реальных условиях эксплуатации преобразователь может генерировать неканонические (анормальные) гармоники, причинами которых являются асимметрия параметров цепи, наличие высших гармоник в питающем напряжении, отклонение углов управления по фазам. В данной работе эти факторы не учитываются.

Уровень отдельных канонических гармоник зависит от параметров цепи и значения уровня уставки [3]. Коэффициент несинусоидальности возрастает при уменьшении $I_{уст}$ и в случае маломощной сети. Отдельные гармоники могут иметь экстремум при некоторых уставках. Как видно из рис.2, наиболее сильными являются пятая и седьмая гармоника тока.

В конце пуска преобразователь входит в режим ограничения по напряжению при полностью открытых тиристорах и не вносит искажений в форму тока.

Гармонические составляющие тока, генерируемые преобразователем, вызывают падения напряжения на сопротивлениях сети, приводя к искажению формы напряжения питающей сети. Показателями качества электроэнергии, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения, по [4] являются:

- значения коэффициентов отдельных гармонических составляющих;
- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

На рис. 3 приведены графики этих показателей в процессе пуска «под отсечку» в системе ТПН-АД. Рассматривались гармоники по тринадцатую включительно. Суммарный коэффициент гармонических составляющих считался только по этим гармоникам

$$K_0 = \frac{\sqrt{U_5 + U_7 + U_{11} + U_{13}}}{U_1}.$$

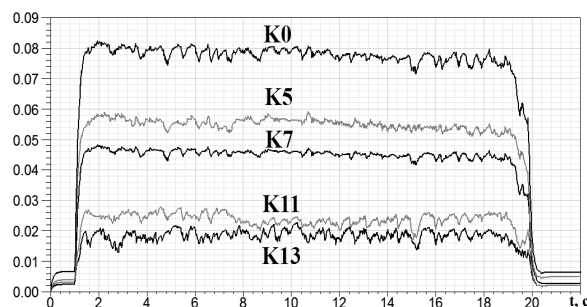


Рис.3. Значения отдельных (K_v) и суммарного коэффициентов (K_0) гармонических составляющих напряжения при пуске без ФКУ

Количественные значения коэффициентов сведены в табл.1, в ней же приводятся предельно допустимые значения этих показателей для сетей 10 кВ по [4].

Таблица 1
Значение предельных и фактических коэффициентов гармонических составляющих

	$K_5, \%$	$K_7, \%$	$K_{11}, \%$	$K_{13}, \%$	$K_0, \%$
ГОСТ	6	4,5	3	3	8
Фактически	5,6	4,6	2,4	2	8

Видно, что седьмая гармоника превышает допустимые пределы, так же на границе находится суммарный коэффициент гармонических составляющих, с учетом неучтенных гармоник он превысит предельное значение.

Методика расчета ФКУ

Для борьбы с высшими гармониками в электрических системах часто применяют силовые резонансные фильтры, которые подключаются параллельно источнику гармоник. Эти фильтры образуют путь с минимальным сопротивлением для протекания токов определенной частоты, тем самым ограничивая их распространение в систему электроснабжения. Обычно одновременно подключают несколько узкополосных фильтров, настроенных на частоты наиболее сильных канонических гармоник тока преобразователя.

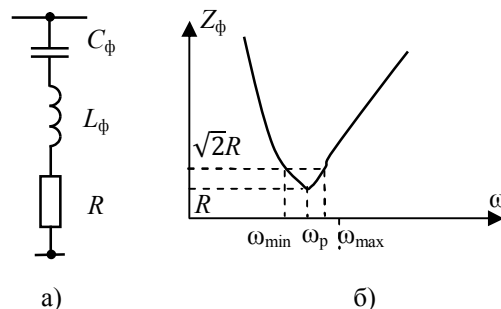
Схема фильтра в однофазном исполнении, расчетная схема и зависимость его полного сопротивления от частоты показана на рис. 4.

Минимальное сопротивление наблюдается при угловой частоте настройки фильтра равной:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_\phi C_\phi}},$$

оно равно эквивалентному активному сопротивлению фильтра. На высоких частотах импеданс рассматриваемой цепи будет иметь

индуктивный характер, а до ω_p – емкостной, отсюда следует, что на частоте основной (промышленной) гармоники фильтр генерирует реактивную мощность, поэтому один или несколько параллельно подключенных к сети фильтров часто называют фильтрокомпенсирующим устройством (ФКУ), которое способно не только отфильтровывать высшие гармоники генерируемые преобразователем, но и компенсировать недостаток реактивной мощности в точке подключения.



а) схема фильтра, б) частотная характеристика
Рис. 4. Узкополосный фильтр

Важным параметром фильтра является его добротность, которая определяется как отношение индуктивного (или емкостного) сопротивления на частоте настройки к активному:

$$d = \frac{X_p}{R}.$$

Добротность определяет скорость затухания свободных составляющих в переходных процессах, происходящих в фильтре, а также полосу пропускания фильтра

$$\omega_{max} - \omega_{min} = \frac{\omega_p}{d},$$

которая условно ограничивается частотами, при которых $Z_\phi = \sqrt{2}R$.

В случае точной настройки фильтра на заданную гармонику для повышения эффективности фильтрации и снижения потерь добротность должна иметь как можно большее значение. На практике ввиду отклонения основной частоты, изменения параметров конденсатора и катушки индуктивности в процессе эксплуатации (старение и тепловые отклонения), а так же из-за промышленных допусков и дискретности настройки элементов возможна некоторая «расстройка» фильтра на величину δ . Качество фильтрации при этом ухудшается, и добротность фильтров приходится снижать для того, чтобы компенсировать эти отклонения. Практические значения d для узкополосных фильтров обычно находятся в диапазоне 30-60 [5].

Расчет и проектирование ФКУ предполагает следующие этапы:

1. Выбор типов и числа фильтров комплекта ФКУ.
2. Определение суммарной реактивной мощности ФКУ и распределение ее между фильтрами.
3. Расчет параметров комплектующих элементов ФКУ - конденсаторов, реакторов, резисторов. [5].

Выбор схемы ФКУ делается на основе гармонического анализа формы кривых тока и напряжения. Критерием правильности выбора типов и числа фильтров ФКУ является выполнение нормативных требований по форме кривых напряжения в точке присоединения преобразователя к сети. Как было рассмотрено выше, наиболее сильными каноническими гармониками ТПН являются 5-я и 7-я, поэтому предварительно рекомендуется устанавливать узкополосные фильтры с этими частотами настройки. Иногда дополнительно устанавливают широкополосный фильтр.

Суммарная реактивная мощность, генерируемая ФКУ на частоте первой гармоники, устанавливается исходя из оценки ее баланса в точке подключения ФКУ. Этот параметр влияет на суммарную емкость конденсаторных батарей. Возможны два варианта [6]:

1. ФКУ не рассматривается как источник реактивной энергии и выполняет только роль фильтра. В этом случае емкость конденсаторов может выбираться исходя из условия обеспечения минимума их установленной мощности $Q_{уст}$ и соответственно стоимости.
2. Параметры конденсаторной батареи выбираются исходя из обеспечения генерации заданной реактивной мощности по первой гармонике $Q_{1ФКУ}$.

Второй подход может дать наибольшую экономическую выгоду при использовании с мощными двигателями, особенно работающими в длительном режиме с постоянной скоростью, например, в электроприводах крупных вентиляторов. ФКУ в этом случае после пуска АД не отключается и выдает реактивную мощность, количественное значение которой находится исходя из анализа ее баланса в точке подключения. При этом необходимо обеспечивать такую степень компенсации реактивной мощности, чтобы значение отклонения напряжения в общей точке преобразователя и сети не выходило за нормальные пределы. Без учета других потребителей можно принять $Q_{1ФКУ}$ равной реактивной мощности двигателя потребляемой в номинальном (рабочем) режиме,

Это решение позволяет уменьшить гармонические искажения от системы ТПН-АД в пусковых режимах, повысить коэффициент мощности в

точке подключения в рабочем режиме, разгрузить питающие кабели и снизить падение напряжение.

После выбора $Q_{ФКУ}$, генерируемой всем ФКУ, важной задачей является ее распределение между отдельными фильтрами, от этого будет зависеть соотношение установленной мощности конденсаторов и реакторов. Рациональное распределение в общем случае является оптимизационной задачей, критериями оптимальности в зависимости от условий применения могут быть масса, стоимость ФКУ или потери в ФКУ. В [5] приводится постановка и алгоритм решения указанной задачи.

В первом приближении можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в [7] и распределить требуемую реактивную мощность между фильтрами пропорционально токам I_v , тем самым выдерживается относительная величина тока гармоник I_v/I_1 на одном уровне для всех конденсаторов, что обеспечивает наилучшее их использование.

Зная реактивную мощность, генерируемую v -м фильтром на основной частоте, емкость и индуктивность фильтра однозначно определяются по формулам:

$$C_{\phi v} = \frac{v^2 - 1}{v^2} \frac{Q_{\phi v}}{\omega_c U^2},$$

$$L_{\phi v} = \frac{1}{C_{\phi v} \omega_v^2}$$

где ω_c - угловая частота основной гармоники сети; ω_v - угловая частота настройки фильтра; U - действующее значение номинального (линейного) напряжения сети.

Полагая, что по фильтру v -ой гармоники протекает только ток первой и резонансной гармоники расчетная установленная мощность конденсаторной батареи v -го фильтра ФКУ определяется по формуле:

$$Q_{устv} = Q_{1v} + Q_v = \frac{v^2}{v^2 - 1} U^2 C_{\phi v} \omega_c + \frac{3I_v^2}{v C_{\phi v} \omega_c}.$$

Эта мощность всегда больше генерируемой.

ПУСК В СИСТЕМЕ ТПН-АД С ФКУ

Ниже приводятся результаты моделирования пуска в системе ТПН-АД с применением ФКУ. Согласно вышесказанному для снижения уровня гармоник применяются два трехфазных резонансных фильтра, выполненных по схеме, показанной на рис. 4, и настроенных на пятую и седьмую гармоники. Исследуемый двигатель при номинальной нагрузке и номинальном напряжении потребляет из сети реактивную мощность $Q_{дN} = 223$ кВар, распределение этой мощности по фильтрам осуществляется пропорционально току пятой и седьмой гармоник.

Параметры фильтра, рассчитанные в соответствии с формулами, указанными выше, приведены в табл. 2.

На рис. 5 приведены значения коэффициентов гармонических составляющих в процессе пуска в системе ТПН-АД после установки ФКУ. Видно, что использование фильтрокомпенсирующего устройства позволило добиться существенного улучшения гармонического состава. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения уменьшился в 2,4 раза, Коэффициенты пятой и седьмой гармоник снизились в 2,7 и 3,8 раза соответственно, дополнительно уменьшились коэффициенты более высоких: одиннадцатой и тринадцатой гармонических составляющих – в 1,5 и 1,4 раза соответственно. В результате все показатели удовлетворяют ГОСТ [4].

Важно отметить, что как в случае отсутствия ФКУ, так и с ним система управления УПП поддерживает один и тот же ток сети, обеспечивающий заданную просадку напряжения. При этом при наличии ФКУ ток двигателя будет больше тока сети, поскольку часть реактивной энергии генерируется конденсаторами фильтров.

Большой ток двигателя облегчает условия его пуска. При данных параметрах время разгона до рабочей скорости сократилось почти вдвое, соответственно существенно уменьшается нагрев двигателя, а как известно длительное пребывание в области больших скольжений и повышенное тепловыделение является одним из недостатков пуска АД с помощью ТПН

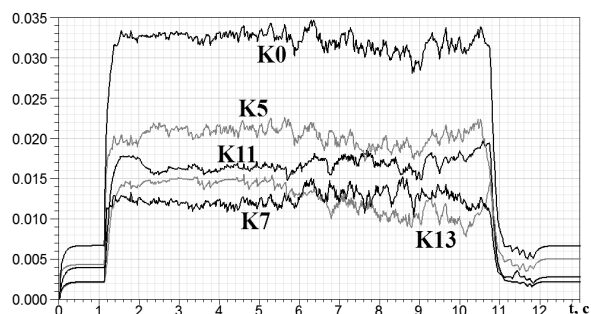


Рис. 5. Значения отдельных (K_v) и суммарного коэффициентов (K_0) гармонических составляющих напряжения при пуске с ФКУ

Таблица 1.

Параметры ФКУ

ν	$Q_{L\nu}, \text{кВар}$	$C_{\Phi\nu}, \text{мкФ}$	$L_{\Phi\nu}, \text{мГн}$	d_ν	$R_{\Phi\nu}, \text{Ом}$	$Q_{\text{сст}}, \text{кВар}$
5	137	4,19	96,8	50	3,04	195
7	86	2,68	77,1	50	3,4	111,5

ВЫВОДЫ

1. При работе УПП происходит искажение напряжения питающей сети. Уровень этого искажения может превышать предельно допустимый в конкретных условиях работы.
2. Применение ФКУ позволяет не только уменьшить негативное влияние высших гармоник, но и обеспечить генерацию реактивной мощности в точке подключения УПП, что в свою очередь облегчает решение основной задачи пуска АД с приемлемым уровнем остаточного напряжения при допустимом нагреве.
3. Подтверждена возможность использования общепринятых рекомендаций по выбору параметров ФКУ для систем ТПН-АД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Л.П., Ладензон В.А., Обуховский М.П., Подолов Р.Г. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами. М.: Энергия, 1970
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. 2000. – 331 с, ил.

- Зюзев А.М. Управление пусковыми режимами асинхронного тиристорного электропривода с учетом ограничений по нагреву и влияния на сеть / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Электротехника. – 2012. №9. С. ?-?
3. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ. 2012
4. Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2003. – 84 с.
5. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: МЭИ. 2006. – 320 с.
6. Олышванг М.В. Фильтрокомпенсирующие цепи статических компенсаторов / М.В. Олышванг, Е.В. Рычков, К.Е. Ананиашвили, В.С. Чуприков // Электричество. – 1990. – №1 – С. 23-29.